

姿控发动机试验热流参数测量系统设计

李志勋¹, 田健江¹, 张 彤²

(1 西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100,

2 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对姿控发动机试验热流参数测试需求, 在分析热流测量机理的基础上, 提出了一种基于 DT800 的高性价比热流参数测试方案。着重论述了系统组成及工作原理、热流传感器安装工艺、数据记录仪选型、软件设计方法、数据处理方法、系统校准方法及系统调试工作。经多次试车验证: 系统操作简便, 性能稳定, 测量数据完整可靠。

关键词: 姿控发动机; 试验; 热流测量; 热流传感器

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2010) 02-0053-06

Design of heat flux measurement system of attitude control engine tests

Li Zhixun¹, Tian Jianjiang¹, Zhang Tong²

(1 Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China;

2 Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: To meet the demand of heat flux measurement of attitude control engine tests, a heat flux measurement program about DT800 is proposed based on the analysis of the heat flux mechanism. The system composition, operation concept, installation technology of heat flux sensors, selection of data logger, design of system software, method of data processing, calibration method of system and the debugging of the system are all described in the paper. Test results show that the system is easy to operate with stable performance and the data is reliable.

Key words: attitude control engine; test; heat flux measurement; heat flux sensor

收稿日期: 2009-12-02; 修回日期: 2010-04-02。

作者简介: 李志勋 (1979—), 男, 工程师, 研究领域为发动机试验测控技术。

0 引言

火箭发动机作为航天器的推进装置,在为航天器提供飞行动力同时也带来了热防护问题。发动机工作过程所产生的高温燃气流主要以热辐射、热传导方式向发动机仪器舱传递大量的热量,若不采取有效的热防护措施,则有可能使舱内仪器在过热环境下工作,影响发动机系统工作的可靠性,因此,有必要对发动机仪器舱进行热防护设计,但前提是要了解发动机热源对仪器舱热量传递的大小。这就需要对仪器舱受热情况进行准确测量,为热防护设计提供可靠的依据。

本文结合某型号姿控发动机试验热流参数测量需求,设计了一套高性能热流测量系统。现将热流测量原理、系统设计方案、系统校准方法及调试工作介绍如下。

1 系统技术指标

(1) 热流传感器量程为 $\pm 3.14 \text{ MW/m}^2$, 测量分辨率不低于 $47.1 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{V}$, 响应时间为 0.1 秒, 适用温度范围宽 ($-250^\circ\text{C} \sim 980^\circ\text{C}$), 精度为 5%;

(2) 24 路差分模拟输入通道, 测量量程为 $\pm 10 \text{ mV} \sim \pm 10 \text{ V}$;

(3) A/D 分辨率为 16 位, 采集速度为 10 点/每通道/每秒;

(4) 系统线性度优于 0.05%, 稳定度优于 0.1%;

(5) 系统在长时间高温环境下运行, 具有高的可靠性, 无死机、失控和数据丢失现象发生。

2 热流测量原理

目前固体表面热流测量有接触式测量和非接触式测量两种方式, 其中接触式测量借助于热阻式热流传感器实现, 非接触式测量基于辐射测温原理, 通过对表面黑度和温度的测量、分析计算来实现。接触式测量可靠性高, 精度好, 费用低, 应用广泛。针对某型号发动机仪器舱表面热

流测量要求, 采用接触测量方式较为合适。热阻式热流传感器原理如下^[1]: 基于热电堆测温原理, 主要由低热传导率的薄片制成, 假定一薄片的热导率为 λ , 粘结在辐射物表面如图 1 所示, 热流矢量方向与受热面相垂直, 单位密度上的热量 q 将会穿过薄片, 当达到热平衡后有

$$q = \lambda \cdot \Delta T / d \quad (1)$$

式中, ΔT 为薄片两边的温度差; λ 为薄片热传导率; d 为薄片厚度。

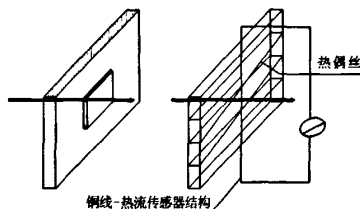


图1 热流测量原理

Fig.1 Principle of heat flux measurement

3 系统硬件方案

3.1 系统组成及工作原理

热流测量系统组成如图 2 所示。

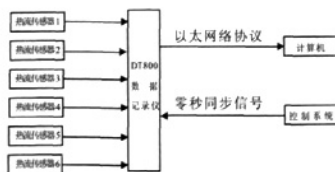


图2 热流测量系统组成

Fig.2 Composition of heat flux measurement system

系统共有 6 个热流测量通道, 热流传感器通过专用测量电缆线接入 DT800 数据记录仪中, DT800 数据记录仪放置试验现场前端, 后端计算机对 DT800 数据记录仪进行编程, 设置相关参数, 并通过以太网将执行程序下载至 DT800 型数据采集仪中, 使之处于试验等待状态。当控制系统发零秒同步信号时, DT800 数据记录仪接收到此信号就进行采集、存储热流测量信号。数据存储采用双倍冗余模式, 采集数据在数据记录仪和后端计算机中同时备份, 保证数据的可靠获得。

试验结束后, 后端计算机通过以太网网络将数据采集仪中的记录数据导出, 存入后端计算机硬盘中, 供数据处理及分析使用。

3.2 热流传感器

3.2.1 热流传感器技术指标

热流传感器有多种类型, 按测温范围分为低温型和高温型。系统选用 ITI 公司(美国国际热仪器公司)的 HT-50 型高温型热流传感器, 传感器热流量程为 $3.15\text{MW}/\text{m}^2$, 温度量程为 $-250^\circ\text{C} \sim 980^\circ\text{C}$, 响应快速 (0.1s), 线性输出, 精度为 5% 。由于该传感器结构坚固, 适用温度范围宽, 耐火烧, 抗振动, 适宜在发动机恶劣试验环境下使用。

3.2.2 热流传感器安装工艺

由于 HT-50 型传感器法兰盘带有用于固定的安装孔, 在安装 HT-50 型传感器时, 可以为该传感器加工安装底座, 先将底座粘贴在被测点上, 再将传感器安装在底座上。

在安装过程中尽量缩小传感器与被测壁面的间距, 减小传感器与被测壁面的热阻, 加快热量传递, 缩短热流稳定时间。减小热阻的有效方法是在被测壁面上涂导热胶, 涂层厚度根据间隙大小而定, 等胶体晾干后再安装传感器, 底座安装好后, 用铅封丝将传感器与底座固定在一起, 要求底座导热性能要好, 导热系数应不低于被测壁面材料的导热系数, HT-50 型传感器的测量电缆是一体的, 使用高温胶带固定传感器与电缆的接头处, 并用玻璃丝带对舱体中的电缆进行包扎, 进行防热处理。

3.3 数据记录仪选型

数据记录仪是热流测量系统的关键环节, 其选型至关重要, 需从通道容量、采样速率、采样分辨率、测量稳定性及可靠性、配置成本等方面综合考虑。常见的专用热流测量仪如 DaqPRO 型数据记录仪、HFM 型数据记录仪等, 多为手持式设备, 测量通道少, 一般不超过 5 个, 多通道的采集速度最快不超过 1 次/每通道/每秒, 数据传输效率低, 多采用串口通讯模式, 而且价格不菲。若采用专用热流测量仪构建测量系统, 需要配置多台设备才能满足某型号发动机试验热流测

量通道需求, 这不仅增加了通道配置成本, 还增加了系统复杂度, 另外 1 次/每通道/每秒的采集速度与试验所要求的 10 次/每通道/每秒的采集速度也不相符, 因此, 针对某型号发动机试验热流测量需求, 建议选用其它类型的数据记录仪。

系统选用 DataTaker 公司的 DT800 数据记录仪构建热流测量系统。它是一款高性价比的便携式测量仪器, 输入量程 $\pm 10\text{mV}$ 到 $\pm 10\text{V}$, 采样分辨率 16 位, 能够测量多种电信号, 具有高的测量精度和可靠性。DT800 数据记录仪为构建热流测量系统开辟了一种设计思路, 主要特点如下: ① HT-50 型热流传感器输出信号为微伏级, 而 DT800 数据记录仪在输入量程为 $\pm 10\text{mV}$ 时, 可以分辨 $1\mu\text{V}$ 的电压信号, 两者结合较为适宜; ② DT800 数据记录仪具有 24 个测量通道, 采样速度不低于 10 次/每通道/每秒, 可以满足某型号发动机试验热流测量要求, 与专用测量仪相比, 通道配置成本低; ③采用以太网通讯模式, 数据传输效率高, 支持数据实时采集、显示及存储功能。

4 系统软件开发

4.1 软件开发工具简介

针对 DT800 数据记录仪应用开发, DataTaker 公司提供了多种软件开发方法, 如 DeTransferTM、Deplot、DeLoadTM、DataTaker ActiveX、DataTaker LabviewTM、DeloggerTM4Pro 等, 既有功能强大、易于使用的软件开发包, 也有编程灵活、易于扩展的软件开发接口。其中 DeTransferTM 是一个灵活的终端程序, 提供程序编辑、数据下载、数据显示等功能, 与 Deplot 相结合可提供对实时数据或历史数据的绘图功能, 其编程采用专门的 Delogger 指令语言, 虽然编程方式灵活, 但需熟练掌握指令语言编程技术, 熟悉硬件结构, 对于初学者有一定难度, 开发周期较长。DeLoadTM 为一便捷的设备管理软件, 提供数据下载、设备配置、数据导出、Access 数据库连接等功能, 通常用于设备网络化管理、数据快速导出。针对特殊的软件开发需求, 建议采用

DataTaker ActiveX 控件或 DataTaker LabviewTM 驱动对数据记录仪进行软件开发, 编程灵活性强, 功能易于扩展, 但需掌握 VB、VC++ 或 Labview 编程技术, 软件调试工作量大, 开发周期较长。

DeloggerTM4Pro 是一套功能强大的软件开发包, 集程序编辑、数据下载、数据导出、实时显示、曲线绘制、报表输出、数据库管理、远程控制等功能于一体, 二次开发简捷, 操作简便, 是目前面向 DT800 数据记录仪应用开发选择较多的一款软件开发工具。经综合考虑, 为方便编程, 缩短开发周期, 本系统选用 DeloggerTM4Pro 软件开发包, 并二次开发了数据采集、记录和显示程序。

4.2 采集程序编制方法

DeloggerTM4Pro 软件开发平台有三种编程方式: 第一种方法采用形象直观的图形界面; 第二种方法采用简单高效的统计表格界面; 第三种方法采用 Delogger 指令语言进行编程。经比较认为, 采用第一种方法, 需要从 Mimic 图库中调用动态组件, 编写组件的执行代码, 执行代码多为特定命令, 例如“run job1”可用来执行数据采集功能, 该方法主要用于编制动态显示程序; 第二种编程方法较为简单, 在 Program Builder 视窗中采用数据表格方式对采集通道的测量类型、采集速度、触发方式、传感器系数等进行配置, 主要用于编制通道配置程序; 第三种方法较为复杂, 在 Text 编辑视窗中采用指令语言编程, 但需熟悉 Delogger 指令编程语言的基本指令系统和编程方法, 例如报警功能程序代码如下:

BEGIN

1CV (W) =0 //变量 1 清零

5CV (W) =1 //变量 5 置 1

6CV(W)=2*5CV //变量 6 设置为 2*(变量 5)

RA1S //每秒执行一次

1CV(W)=1CV+1 // 变量 1 累加 1

ALARM (1CV>6CV){[XB 5CV (W)=5CV+1 6CV (W)=2*5CV]}; // 当变量 1 大于变量 6 时, 启动报警处理, 即变量 5 累加 1, 变量 6 设置为 2*(变量 5)

RBX LOGONB; // 发送报警标志

1..5TK // 读取 1~5 通道数据

END;

对于上述三种编程方法, 第一, 二种方法相对简单, 软件开发周期短, 第三种方法相对复杂, 软件调试工作量大。若采集程序不涉及复杂的检测功能及计算方法, 建议采用第一种或第二种编程方法。

4.3 实时显示界面

实时显示界面采用 DeloggerTM4Pro 中的 Mimic 和 Chart 设计。Mimic 主要用于设计动态监视界面, 提供了多种动态组件如模拟仪表、数字仪表、LED 指示灯、温度计、报警器、控制按钮等, 供数据显示、事件报警、状态指示、远程控制等使用。Chart 则用于提供对历史数据或实时数据的曲线绘制功能, 可同时绘制 12 条不同颜色的曲线, 其中实时曲线以滚屏方式显示。

结合 Mimic 和 Chart 软件功能, 系统实时显示界面采用模拟指针仪表和数字窗口相结合的方式对热流测量数据进行实时显示, 采用 LED 指示灯对零秒同步信号进行状态显示, 采用“清除记录”、“启动采集”或“停止采集”按钮对 DT800 数据记录仪进行远程控制, 在启动采集前应先点击“清除记录”按钮, 将 ATA 闪存卡中的旧数据清除掉, 需要停止记录时点击“停止采集”按钮即可。另外采用 Chart 对 6 个热流测量通道数据进行曲线绘制, 不同颜色的曲线对应不同的通道, 通过实时动态曲线可以反映 6 个通道的热流变化趋势。

4.4 数据处理程序

为提高数据采集过程的可靠性, 建议采用冗余方式存储数据, 采集数据既要存储在 DT800 数据记录仪的 ATA 卡中, 又要存储在后端计算机中。试验结束后需要对采集数据进行处理, 对于 ATA 卡中的数据, 采用 DeloggerTM4Pro 中的 Unload 工具将数据下载至计算机中, 并转换为 *.dlr 或 *.csv 格式文件, 供数据分析使用, 其中 *.dlr 文件仅限在 DeloggerTM4Pro 中的 Spread 或 Analyse 中使用, 若要对数据进行处理, 如截取数据、插入新的时间序列、数据查找、转换 *.txt 文件等, 则应将 Spread 或 Analyse 中的数据导出到 ex-

cel 中, 以方便使用。因此, 建议将 ATA 卡中的数据转换为 *.csv 格式文件, 可直接导入到 Excel 中, 供数据处理使用。

后端计算机采用 *.txt 格式记录数据, 若将记录数据直接导入到 Excel 中, 则出现数据排序混乱、数据错位现象, 很难对其数据处理。为此, 采用 VB 工具开发了专门的数据处理程序, 将记录数据转换为标准的文本格式, 供 Excel 数据处理使用。该处理程序按试验数据处理要求设计, 除了对数据存储格式进行转换外, 还通过对零秒同步信号的判断自动截取数据, 并依据采样速率自动添加时间步数, 最终转换为标准的数据文件。综合上述数据处理方法, 建议采用后一种数据处理方法, 操作简便, 省时省力。

5 系统校准方法

热流传感器和 DT800 型数据采集仪是影响热流参数测量精度的关键环节, 需要定期进行系统校准。常见的系统校准法有两种: 电校准法和物理量校准法, 其中物理量校准效果较好, 有助于提高测量精度。电校准法操作相对简单, 只需在 DT800 型数据采集仪的测量前端按三遍六档方法加载标准电压信号, 但缺点是只校准了数据采集环节的测量误差, 而没有考虑传感器环节的测量误差。物理量校准则可以对整个系统的测量误差进行校准, 但目前国内能够校准 HT-50 热流传感器的计量单位很少, 据了解航天部 102 所具有该传感器校准能力, 考虑到 DT800 型数据采集仪为便携式设备, 因此, 可以将整个热流测量系统带到计量单位进行物理量校准。航天部 102 所物理量校准原理如图 3 所示。

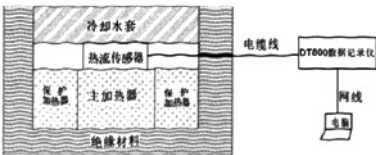


图 3 校准原理图

Fig.3 Principle of heat flux calibration

它基于保护热板法原理^[2], 保护热板法是国际上最通用的测量导热系数的标准方法之一, 也是现在热流传感器校准最为准确的方法。

校准时, 采用图 3 中的校准装置对热流传感器施加一个稳定的一维热流源 (方向与传感器受热面垂直), 通过测量热流传感器在施加不同热流源下的热电势, 最后用最小二乘法拟合曲线, 即可获得准确的热流传感器系数。热流传感器系数的计算公式如下:

$$C=q/E \tag{2}$$

式中, C 为热流传感器系数 (分辨率) 单位 $W/m^2 \cdot mv$ 或 $W/m^2 \cdot \mu V$; q 为通过测头的热流密度, 单位 w/m^2 ; E 为测头的输出电势, 单位 mV 或 μV ;

6 系统调试

6.1 系统性能测试

采用模拟电量法对系统进行调试, 对 DT800 数据记录仪的 1~7 号通道同时加载标准电压信号, 采集速度为 10 点/每通道/每秒, 采用 ATA 闪存卡和计算机同时存储采集数据。

(1) 线性度测试

测试时, 标准电压分 11 档, 范围从 -8.775mV 到 8.775mV, 对每一档输入电压, 采集 30 秒。经测试, 线性度优于 0.01%。

(2) 稳定性测试

测试时, 在输入端加载 8.775mV 标准电压, 间隔 30 分钟记录一次数据, 共记录 9 次。经测试, 稳定度优于 0.07%。

6.2 系统整体调试

试车状态模拟调试是将 6 个热流传感器分别接入 DT800 数据记录仪的 1~6 号模拟量输入通道中, 启动热流采集系统, 用电吹风对 6 个测量通道逐一加热, 各通道热流测量曲线如图 4 所示。现将调试过程总结如下:

(1) 当电吹风加热时, 各通道热流测量值均呈上升趋势, 但并非直线上升, 最主要的原因是热流传感器加热面和背面及周围环境有热交换过程存在, 使加热面和背面的温差不断变化, 变化

率时小时大，也就影响到热流值变化。

(2) 传感器加热面和热源距离越近，热阻越小，热传递越充分，热流值变化越明显。

(3) 热流值变化率和热源温度无关，主要取决于热流传感器加热面和背面及周围环境热交换的快慢。

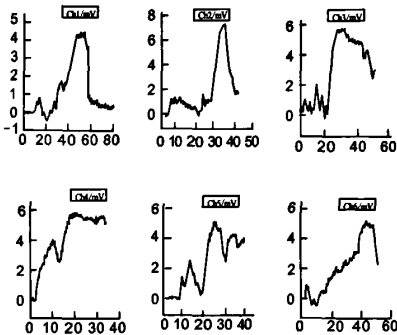


图 4 电吹风加热曲线

Fig.4 Heating test curve

7 结论

本系统开发完成后参加了多次试车，系统操作简便，工作可靠，记录的数据完整准确，满足测量精度要求。根据系统的调试及试车验证，得出如下结论：

(1) $\pm 10\text{mV}$ 量程内，DT800 数据采集仪线性度优于 0.01%，稳定度优于 0.07%，能够分辨微伏级电压信号，适宜与 HT-50 热流传感器接口使用，可确保系统实现 5% 的热流测量精度；

(2) 经多次试验验证，DT800 数据采集仪工

作正常，无死机和失控现象，具有高的可靠性；

(3) DT800 数据采集仪采用内置备用电源，即使试验系统的 UPS 供电线路出现故障，DT800 数据采集仪仍然可以正常工作；

(4) 采集数据采用双倍冗余方式存储，可在 DT800 数据采集仪和后端计算机中同时备份，从而避免了由于后端计算机或网络通讯出现故障时，导致采集数据的丢失；

(5) 系统软件设计界面友好，功能易于扩展，操作简单。

参考文献：

[1] 廖亚非. 热流计的发展、国际领先技术与改进方向研究[J]. 重庆大学学报, 2005, 27(2): 84-87.
[2] 司光宇. 热流密度准确测量—智能热流计[J]. 大庆石油学院学报, 1994, 18(2): 113-117.
[3] 张忠进. 测量累计热流量的热流计及其快速标定[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(2): 311-315.
[4] 吴洪潭. 表面温度和热流的一种间接测量技术[J]. 宇航计测技术, 2003, 23(2): 30-34.
[5] 马彬. 新型热流计测量技术的探索研究[J]. 新技术新仪器, 2007, 27(2): 23-25.
[6] 张志红. 可编程控制器在发动机冷调试验中的应用[J]. 火箭推进, 2007, 33(1): 59-62.
[7] 混平. 缓变测量系统的干扰及抑制方法 [J]. 火箭推进, 2007, 33(2): 59-62.

(编辑：王建喜)